

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИНИЦИИРОВАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ СКОПЛЕНИЙ МЕТАНА УДАРНОЙ ВОЗДУШНОЙ ВОЛНОЙ ПРИ АВАРИЙНЫХ ВЗРЫВАХ ШАХТНОЙ АТМОСФЕРЫ

В.В. Соболев, Национальный горный университет, Украина

Н.Н. Налісько, Придніпровська державна академія будівництва і архітектури, Україна

Представлена методика и результаты решения задачи инициирования метановоздушной смеси ударной волной. Методика построена на совместном решении уравнений газодинамики и химической кинетики горения смеси метан–кислород в воздухе численным методом. Видимые эффекты инициирования показали сильное влияние газодинамики на кинетику химических реакций взрывного горения, что соответствует тепловому механизму воспламенения и перехода горения в детонацию.

Введение. Увеличение глубины ведения горных работ на угольных шахтах Украины, переход к отработке удаленных выемочных полей приводит к повышению газообильности горных выработок и усложнению ликвидации возможных пожаров и взрывов газа и пыли. Опасность этих видов аварий, кроме прочего, состоит в том, что они могут сопровождаться повторными взрывами рудничной атмосферы опасными для горноспасателей и других ликвидаторов аварий [1]. Взрывы газозвушних смесей (ГВС) приводят к образованию ударных воздушных волн (УВВ) обладающих большим запасом энергии и способных распространяться по сети горных выработок. Одним из способов защиты людей от повторных взрывов является защита расстоянием и сооружение взрывоустойчивых перемычек для изоляции аварийных участков. На сегодняшний день, расчет безопасных расстояний производится по методикам основанных на экспериментальных исследованиях 70-х годов прошлого столетия. Практика показывает, что результаты расчетов не всегда надежно устанавливают безопасные расстояния и параметры взрывозащитных сооружений. Об этом свидетельствуют тяжелые последствия повторных взрывов в горных выработках во время работ по ликвидации аварий на шахтах им. А.Ф. Засядько (2007), в результате которых погибли и были травмированы горноспасатели выполняющие работы как во время возведения изолирующих перемычек, так и работающие под их защитой. Аналогичные ситуации возникали при взрывах на шахтах «Северная» Воркута (2016), им. А.Г. Стаханова ЧАО «Укруглестрой» (август 2012), шахте им. Ю.А. Гагарина ГП «Артемуголь» (1983).

Анализ последних исследований и постановка задачи. Такое положение дел возможно из-за неполноты учета факторов газодинамических процессов, возникающих при распространении УВВ в горных выработках в условиях эндогенных пожаров и изолированных пространств. Это также осложняется отсутствием единых подходов к расчету параметров УВВ [2]. В научных центрах по безопасности горных работ выполнялись работы изучению действия УВВ в сети горных выработок с целью совершенствования методики расчета безопасных расстояний [3, 4]. Полученные результаты показывают, что в эмпирических зависимостях, применяемых в настоящее время, не учитываются некоторые процессы, например, волновые эффекты отражения, потери давления на сопряжениях выработок принимаются без учёта скорости движения газовых потоков и др. В условиях протяженных изолированных выработок может возникать несколько загазированных участков или локальных скоплений метана. Взаимодействие ударной воздушной волны с ними мало изучены, хотя известно, что она обладает иницирующей способностью. В одних из ранних работ по этому вопросу (Э.О. Миндели, 1972, Б.И. Вайнштейн, 1974) рассматривается воспламеняющая способность УВВ при взрыве промышленных ВВ. Устанавливаются критерии по массе воспламеняющего заряда, и на их основе совершенствуются методики испытания предохранительных ВВ в уголковой мортире. В работе [5] изучается время инициирования метановоздушной смесей УВВ в условиях камеры сгорания двигателей.

Значительное количество исследований в этом направлении проводится в университетах Китая [6, 7]. Однако закономерностей инициирования ГВС с учетом химической кинетики горения метана, пригодных для инженерных расчетов в условиях горных выработок не получено.

Цель работы – повышение безопасности работ по ликвидации пожаров в горных выработках путем учета в расчете безопасных расстояний, закономерностей инициирования метановоздушных смесей ударной воздушной волной при вероятных повторных взрывах рудничной атмосферы, математическое моделирование прохождения прямой и отраженной ударной воздушной волны через загазированные участки выработок.

Материал и результаты исследований. При рассмотрении задач газовой детонации обычно используют классические теории детонационных волн Чепмена–Жуге и Зельдовича–Неймана–Дёринга, построенные на основе одномерной модели устойчивой детонационной волны. Современные исследования показывают, что эти теории, как и любые другие, являются несколько идеализированными и основная причина нарушения идеализации в реальности это неустойчивость газодинамических и химико-кинетических процессов проявляющееся в усилении слабых возмущений, нарушении одномерности течения, возникновении изломов волнового фронта и др. [8]. Было установлено, что существуют сильные и слабые детонационные волны, распространяющиеся со скоростями отличными от волн Чепмена–Жуге, что имеет место взаимосвязь между интенсивностью инициирующей ударной волны и кинетикой химической реакции [9]. Все это проявляется в широком разнообразии видимых эффектов газовых взрывов, которые на сегодняшний день, ввиду несовершенства теорий и как следствие, методов расчета, тяжело прогнозировать. Так в работе [10], для условий горных выработок, устанавливаются типы взрывов (табл. 1), которые отличаются от классификаций, принятых в рамках единого термина «пожаровзрывоопасность».

В данной работе, для установления параметров распространения УВВ с учетом взрывов локальных скоплений метана используется численное моделирование течений газового потока с применением математической модели ударной трубы, в которой реализован газодинамический подход.

Математическая постановка задачи следующая. Горная выработка моделируется цилиндрическим каналом (рис. 1). С одной стороны, канал имеет свободный выход, с другой канал закрыт жесткой стенкой. Внутри канала, в расчетной области, находится участок, заполненный метановоздушной средой (у тупиковой стенки). На некотором расстоянии от этого участка находится область теплового взрыва, которая является источником УВВ.

Таблица 1 – Типы взрывов шахтной атмосферы в горных выработках

		Стадии развития взрыва пылегазовоздушных смесей в горных выработках угольных шахт							
		Горение	Вспышка	Балансирующие взрывы	Слабые взрывы в начальной стадии их развития	Слабые взрывы	Сильные взрывы в начальной стадии их развития	Сильные взрывы	Детонационный взрыв
Характер протекания		Свободное горение в ограниченном объеме	Медленное распространение в ограниченном объеме	Вялое распространение с остановками	Распространение со скачками скорости	Распространение со скачками скорости	Бурное распространение	Бурное распространение с ускорением	Очень бурное распространение с предельной скоростью
Избыточное давление на фронте УВВ, МПа		<0,01	0,01–0,02	0,02–0,06	0,06–0,15	0,15–0,3	0,3–0,65	0,65–1,7	>1,70
Скорость распространения УВВ, м/с		0	<367	<416	416–500	500–635	635–1000	1000–1500	1500–2500
Скорость фронта пламени, м/с		<1	1–40	40–100	100–250	250–340	340–660	660–1000	1000–2500

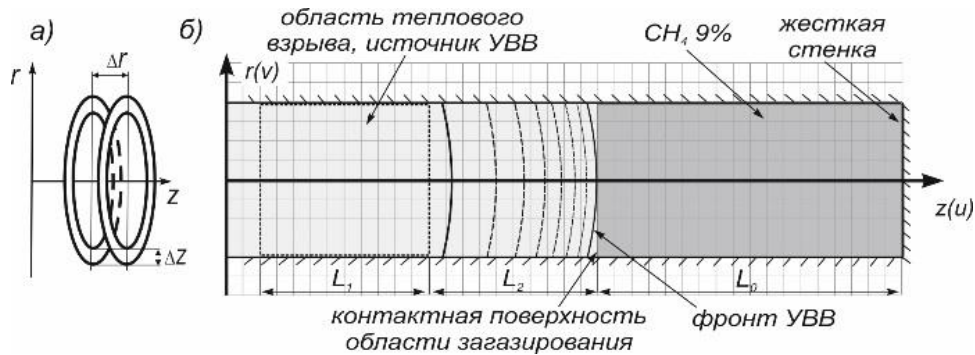


Рис. 1. Общая структура расчётной сетки: а) в объёмном представлении, в цилиндрической системе координат; б) в плоском представлении; Δr , Δz – размеры расчетной ячейки, слева – тип границы расчетной области «свободный выход», снизу, сверху – тип границы расчетной области «непротекание», справа – тип границы расчетной области «жесткая стенка»; v , u – компоненты вектора скорости

Задача решалась путём использования метода численного счёта уравнений газодинамики в системе "ГВС – окружающая среда". Движение среды в цилиндрической системе координат описывается уравнениями Эйлера (в дивергентном виде):

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \bar{W}) = 0, && \text{неразрывности} \\
 & \left. \begin{aligned}
 & \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u \bar{W}) + \frac{\partial P}{\partial z} = -\tau_{mp} \frac{\Pi}{S}, \\
 & \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v \bar{W}) + \frac{\partial P}{\partial r} = 0
 \end{aligned} \right\} && \text{движения} \\
 & \frac{\partial \rho E}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho E \bar{W}) + \operatorname{div}(P \bar{W}) = q \Pi + q_x \rho \frac{\partial \alpha}{\partial t}, && \text{энергии,}
 \end{aligned} \quad (1)$$

где ρ – плотность; P – давление; \bar{W} – вектор скорости; u , v – компоненты скорости \bar{W} по оси z и r соответственно; z , r – цилиндрические координаты; E – полная энергия; J – внутренняя энергия газа; τ_{mp} – напряжение поверхностных сил трения газового потока о стенку; q – плотность теплового потока в стенку канала; S , Π – поперечное сечение и периметр выработки; q_x – тепловой эффект химической реакции горения углеводородов; α – мольная доля углеводорода в шахтной атмосфере; t – время.

Решения системы уравнений (1) производилось с использованием однородной схемы сквозного счёта. В качестве такой схемы был применен модифицированный метод крупных частиц.

Для реализации учета энергии горения в (1), в расчетной схеме используется суммарное кинетическое уравнение химической реакции горения смеси метана и кислорода в воздухе [11]. Химическая реакция представлена в виде одной брутто-схемы (обобщенного кинетического механизма):



Скорость реакции по i -ому компоненту $i=1, 2$ задается в форме Аррениуса:

$$-\frac{dc_i}{dt} = Z \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \prod c_i^{v_i}, \quad (3)$$

где Z , E_a , v_i – эффективные предэкспоненциальный множитель, энергия активации и порядок реакции по i -му компоненту (принимались согласно работе Westbrook C.K. Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuel in Flames, 1981).

Уравнения химической кинетики решалось численным методом совместно с уравнениями газовой динамики и уравнениями состояния. Разностный аналог уравнения (3) представлялся в следующем виде:

$$-\frac{[c_1]_{i,j}^{n+1} - [c_1]_{i,j}^n}{\Delta t} = k \cdot ([c_1]_{i,j}^n)^{\nu_1} ([c_2]_{i,j}^n)^{\nu_2},$$

где k – константа скорости химической реакции горения; i, j – целочисленные координаты расчетной ячейки; n – номер временного слоя.

При расчете уравнения сохранения энергии (1) в правую часть добавляется слагаемое:

$$\Delta t \cdot QZ \exp(-E_a / RT) \cdot ([c_1]_{i,j}^n)^{\nu_1} ([c_2]_{i,j}^n)^{\nu_2}$$

где Q – теплотворная способность горения метана в воздухе при стехиометрическом составе метан-кислород.

В задаче принимались следующие допущения: взрывчатая газоздушная смесь равномерно распределена на прямолинейном загазированном участке, граничные условия теплопроводности в стенку канала – условия третьего рода с постоянным коэффициентом теплообмена газового потока со стенкой $50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и теплопроводностью стенки (аргиллит) $2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, шероховатость стенки канала соответствует установленной крепи типа СВП-19 с шагом установки $1,0 \text{ м}$.

Численный эксперимент проводился для выработки диаметром 2 м , длина загазированной участка $L_0 = 5 \text{ м}$, расстояние от границы загазированной области до источника УВВ $L_2 = 3 \text{ м}$, длина источника УВВ $L_1 = 3 \text{ м}$ (рис. 1). Участок загаживания располагался у тупика с таким расчетом, чтобы УВВ пройдя сквозь него могла отразиться от жесткой стенки. Таким образом, исходная смесь сжимается дважды и можно проследить действие отраженной УВВ на ГВС.

Источником УВВ в задаче является участок выработки в котором происходит мгновенный объемный взрыв. Избыточное давление начального взрыва можно задавать произвольно, что позволяет регулировать амплитуду давления во фронте УВВ, тем самым моделируя различную мощность источника и его удаленность относительно облака ГВС.

При распространении УВВ по выработке происходит падение амплитуды волны, а при ее вхождении в облако ГВС происходит изменения положения контактной поверхности и концентрации метана внутри облака за счет приведения в движения газа за фронтом УВВ (рис. 2). Поэтому характерным параметром взаимодействия УВВ с ГВС будем считать амплитуду волны в момент прохождения фронта волны через контактную поверхность области загаживания (рис. 1).

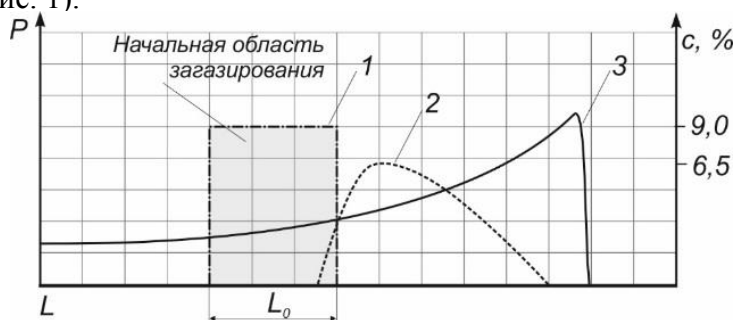


Рис. 2. Динамика изменения профиля концентрации метана (c) при прохождении УВВ через ГВС без ее инициирования (загазированная область находится на некотором расстоянии от тупика): 1 – начальная концентрация метана, 2 – профиль после прохождения УВВ, 3 – давление в ударной волне (P)

В действующих нормативных методиках расчета параметров распространения УВВ в горных выработках максимальное значение избыточного давления ограничивается величиной $2,8 \text{ МПа}$, поэтому область варьирования характерного параметра взаимодействия УВВ с ГВС

составляла 0,1–3 МПа.

Проведенные численные эксперименты показали, что УВВ с амплитудой до 1,1 МПа проходя через ГВС не оказывает на нее инициирующего действия, происходит только снижение концентрации и смещение облака за счет движения потока. При амплитуде 1,1 МПа происходит вспышка ГВС, но только в отраженной УВВ. Причем вспышка наблюдается вблизи контактной поверхности, в которую входил фронт прямой УВВ и под действием которого она значительно сместилась от начального положения (рис. 3,а). На момент прихода отраженной волны в точку вспышки, ГВС имело давление 0,4 МПа, амплитуда отраженной волны составляла 1,3 МПа. Возникновение вспышки на границе облака происходит по причине максимального времени воздействия на эту область прямой волны сжатия (т.е. реализуется необходимое время индукции) и снижения энергии активации под действием давления.

В диапазоне характерного давления на фронте УВВ от 1,4 МПа происходит воспламенение ГВС под действием отраженной волны, а начиная с 1,8 МПа возникает переход начавшегося горения в детонацию (рис. 3б), что обусловлено первоначальным адиабатическим сжатием газа в падающей УВВ. Зарождение детонационной волны сопровождается резким скачком давления более чем в 10 раз в точке перехода горения в детонацию. Это хорошо согласуется с данными работ [12, 13] в которых показано повышение термодинамической эффективности сжигания газов в режиме детонации и увеличение при этом степени сжатия газов в 20–30 раз.

Начиная с величины амплитуды 2,3 МПа происходит интересное явление: прохождении падающей волны вызывает воспламенение смеси, а отражённая волна, возвращаясь к очагу горения, промотирует реакцию горения переводя ее в режим детонации (рис. 3,в). Такой эффект происходит при синхронизации выделения энергии химической реакции горения и газодинамических процессов [14].

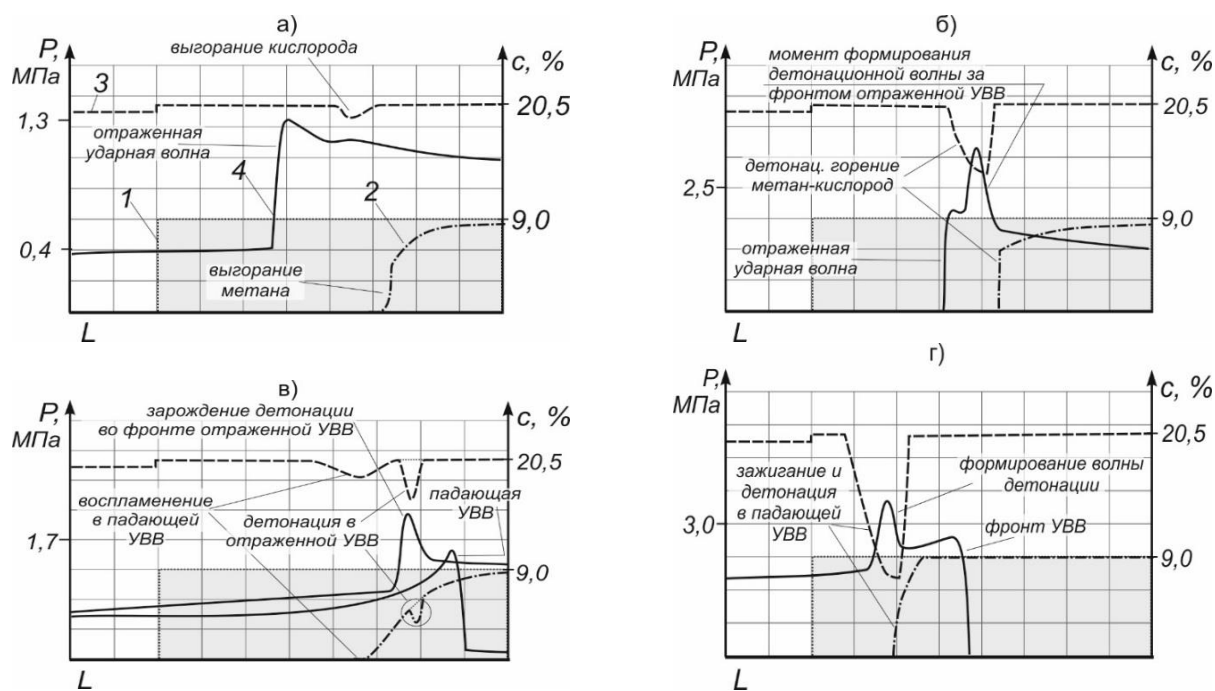


Рис. 3. Профили давлений и концентраций газов при различных эффектах инициирования локальных скоплений метана ударной воздушной волной: а) вспышка в отраженной волне, б) воспламенение и детонация в отраженной волне, в) воспламенение в падающей и детонация в отраженной волне, г) воспламенение и детонация в падающей волне; 1 – профиль начальной концентрации метана в локальном скоплении, 2 – концентрация метана при прохождении УВВ, 3 – концентрация кислорода, 4 – давление в отраженной волне

Устойчивое зажигание и детонацию ГВС метан-воздух вызывает прямая УВВ с амплитудой 2,6 МПа (рис. 3г). Причем вначале происходит зажигание смеси, а затем через 1,7 мс горение переходит в детонацию, волна которой догоняет фронт ударной волны. Зажигание происходит, как и в предыдущих экспериментах на контактной поверхности (которая успевает сместиться) и за фронтом

УВВ, т.е. до момента зажигания фронт волны успевает продвинуться вглубь ГВС. С увеличением амплитуды УВВ время от возникновения горения до перехода процесса в детонацию сокращается, точка зажигания смещается во фронт ударной волны, а само зажигания происходит в момент входа фронта волны в локальное скопление метана. Такой процесс наблюдался при амплитуде 3,7 МПа, время от зажигания до детонации смеси составило 0,15 мс. При амплитуде 4,9 МПа зажигание и детонация смести возникают одновременно в момент входа фронта УВВ в ГВС.

Параллельно с экспериментами для стехиометрической смеси (с небольшим обеднением) выполнялись расчеты для сниженных концентраций метана. Уменьшение концентрации до 6,2 % незначительно увеличивает пределы избыточных давлений в ударной волне при которых наступает тот или иной эффект зажигания и детонации. Далее, величина давлений для инициирования детонации сильно возрастает и начиная от нижнего концентрационного предела горения и до 3,9 % происходит горение метана за фронтом УВВ, при амплитуде не менее 2,7 МПа, без образования ударных волн. При дальнейшем снижении содержания метана инициирование горения, для возможных в горных выработках амплитуд УВВ не происходит.

Полученные результаты имеют хорошую корреляцию с данными экспериментов по определению минимальных масс предохранительных ВВ воспламеняющих метановоздушную среду (МВС), проведенными МакНИИ в опытном штреке [15]. В результатах приведены значения критических амплитуд в падающих УВВ генерируемых зарядами ВВ с учетом содержания ингибиторов горения в продуктах детонации. Эти значения, как и ожидается, выше величин, полученных в численных экспериментах, а экстраполяция в нулевую сторону содержания солей-ингибиторов позволяет выйти на критические давления, которые определены в численном расчете для зажигания и инициирования ГВС в прямой волне. Это позволяет утверждать, что критические параметры ударных волн, полученные в данной работе для различных эффектов инициирования, являются достоверными и сравнимыми между собой.

Как видно из результатов численных экспериментов ударные воздушные волны, распространяющиеся по горным выработкам, представляют опасность с точки зрения возможного воспламенения локальных скоплений метана хотя и в небольшом диапазоне амплитуд (от 2,6 МПа), реализуемых в условиях горных выработок. Если на пути распространения УВВ встречается отражающие поверхности в виде загромождённого сечения или резких поворотов, то диапазон амплитуды расширяется до 2,3 МПа (табл. 2). Поскольку УВВ с такими амплитудами, в условиях горных выработок затухают достаточно быстро, то инициирующая способность УВВ сохраняется вблизи действия источников взрывов.

С практической точки зрения нам необходимо знать на каком расстоянии от источника взрыва (критическое расстояние) и при каких условиях может возникать инициирование локальных участков загазирования, а также каким образом взрыв локальных скоплений метана влияет процесс диссипации энергии УВВ. Первый вопрос можно решить с использованием стандартной методики расчета амплитуды давления во фронте УВВ (Устав ГВГСС, 1997) либо применить регрессионные зависимости (3). Второй вопрос предлагается решать по следующему алгоритму. Если в процессе расчета установлена возможность взрыва локального скопления метана, то необходимо рассчитать, по действующей методике, величину давления взрыва в этом локальном скоплении метана. Если полученное значение превышает избыточное давление в ударной волне, которая распространилась бы до противоположной границы скопления, то дальнейший расчет продолжать от этой границы с новым значением амплитуды.

По результатам экспериментов были получены функциональные зависимости, с помощью которых можно определить расстояния от источника взрыва (L_k), при которых возможно инициирование локальных скоплений метана. Эти расстояния зависят от размеров источника и начальных давлений в УВВ (P_n). Источник взрыва это загазированный участок горной выработки от точки воспламенения до границы ГВС-воздух. Поскольку на скорость затухания УВВ влияет не только длина этого участка, но и размер поперечного сечения выработки, то зависимость была определена с учетом относительной длины источника $L_2=L_2/d_n$, где L_2 – длина источника, d_n – приведенный диаметр выработки. Регрессионные уравнения были получены путем обработки результатов численных экспериментов методом наименьших квадратов.

Таблица 2. Закономерности инициирования локальных скоплений метана ударной воздушной волной, распространяющейся по горным выработкам

Амплитуда во фронте УВВ*, МПа	Падающая УВВ			Отраженная УВВ		
	Иницирующий эффект	Время перехода горения в детонацию	Место инициирования горения	Иницирующий эффект	Амплитуда отраженной волны в момент инициирования ГВС, МПа	Давление ГВС в месте инициирования, МПа
< 1,1	–	–	–	–	–	–
1,1	–	–	–	вспышка	1,3	0,4
1,4	–	–	–	воспламенение во фронте и частичное выгорание метана	1,9	0,8
1,8	–	–	–	воспламенение во фронте, переход в детонацию за фронтом через 350 мкс	2,4	1,0
2,3	воспламенение	–	за фронтом	детонация	4,6	1,0
2,6	воспламенение, переход в детонацию	1,26 мс	непосредственно за фронтом	–	–	–
3,6	воспламенение, переход в детонацию	0,4 мс	непосредственно за фронтом	–	–	–

* характерный параметр взаимодействия УВВ с ГВС

Эксперименты проведены по плану полного факторного эксперимента. При решении уравнений нелинейной регрессии использовалась линеаризация уравнений методом логарифмирования.

$$L_k = \frac{d_n}{(13,04P_n^{-0,1} + 1,3L^{-0,1} - 11,7)^9}; \quad L'_k = \frac{d_n}{(8,82P_n^{-0,3} + 1,37L^{-0,3} - 6,1)^3}, \quad (3)$$

где L_k – расстояние от источника взрыва на котором возможно инициирование локальных скоплений метана в прямой волне, м; L'_k – расстояние на котором возможно инициирование локальных скоплений метана в отраженной волне, рассчитывается в случае расположения локального скопления метана у загроможденных участков или на резких поворотах выработки, м; d_n – приведенный диаметр выработки, м.

Выводы. Полученные результаты численных экспериментов по инициированию метановоздушной смеси ударной воздушной волной, в условиях горных выработок, хорошо согласуются с известными экспериментальными данными. Видимые эффекты инициирования показывают сильное влияние газодинамики на кинетику химических реакций взрывного горения.

Полученные закономерности воспламенения и детонации локальных скоплений метана в падающих и отраженных УВВ позволяют эффективно определять безопасные расстояния при аварийных работах и снизить риски несчастных случаев для подземных рабочих.

Список литературы

1. Брюханов А.М., Мнухин А.Г., Бусыгин К.К. Анализ обстоятельств взрывов метана на шахтах и мероприятия по их предотвращению // Уголь Украины. – 2003. – № 4. – С. 37–40.
2. Левченко О.Г., Володченко Н.В. Аналіз методів і методик оцінки уражаючих факторів повітряної вибухової хвилі // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво». – 2012. – Вип. 22. – С. 211–216.
3. Математическое моделирование нестационарных процессов вентиляции сети выработок угольной шахты / И.М. Васенин, Э.Р. Шрагер, А.Ю. Крайнов, Д.Ю. и др. // Компьютерные исследования и моделирование. – 2011. – Т. 3, № 2. – С. 155–163.
4. Чебенко В.М. Пилогазопридушення при підричних роботах // Проблеми охорони праці в Україні: збір. наук. праць. – К.: ДУ «ННДПБООП». – 2003. – № 7. – С. 33–38.
5. Моделирование процессов задержки поджига смеси метан-воздух ударной волной / С.А. Поняев, И.В. Апевалов, А.С. Лебедев и др. // Труды военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2013. – Вып. 641. – С. 61–68.
6. Huang J., Hill P.G., Bushe W.K. and Munshi S.R. Shock-tube study of methane ignition under engine-relevant conditions: experiments and modeling // Combustion and Flame. – 2004. – vol. 136, iss. 1–2. – PP. 25–42.
7. Petersen E.L., Davidson D.F., Hanson R.K. Kinetics modeling of shock-induced ignition in low-dilution CH₄/O₂ mixtures at high pressures and intermediate temperatures // Combustion and Flame. – 1999. – Vol. 117, iss. 1–2. – pp. 272–290.
8. Васильев А.А. Детонационные свойства предельных углеводородов // Физика горения и взрыва. – 2009. – Т. 45, № 6. – С. 82–90.
9. Нетлетон М. Детонация в газах / Пер. с англ.; под ред. Л.Г. Гвоздевой. – М.: Мир, 1989. – 280 с.
10. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по локализации и предупреждению взрывов пылегазовоздушных смесей в угольных шахтах»; зарег. Минюст России 25.01.12, рег. № 26359 // Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти. – 2013. – № 7 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://jurizdat.ru/editions/official/bnafoiv/archive/2013/7.htm>
11. Чернай А.В., Налісько Н.Н., Деревянко А.С. Кинетика окисления метана кислородом и его роль в формировании взрывной воздушной волны в шахтных выработках // Науковий вісник НГУ. – 2016. – Вип. 1 (151). – С. 63–69.
12. Влияние энергии инициирования и геометрии канала на переход горения в детонацию/ В.В. Голуб, Д.И. Баланов, В.В. Володин, С.В. Головастов // Горение и плазмохимия. – 2007. – Т. 5, № 1–2. – С. 95–108.
13. Агафонов Г.Л., Тереза А.М. Воспламенение пропана в ударных волнах // Химическая физика. – 2015. – Т. 34, № 2. – С. 49–60.
14. Гельфанд Б.Е., Попов О.Е., Чайванов Б.Б. Водород. Параметры горения и взрыва. – М.: Физматлит, 2008. – 288 с.
15. Калякин С.А. Определение критических параметров ударных волн при взрыве заряда ВВ, вызывающих воспламенение метановоздушной смеси // Наукові праці ДонНТУ. Серія «Гірнично-геологічна». – 2012. – Вип. 16(206). – С. 133–139.